

УДК 007.52

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.271-278>**К. К. Щербина**, доц., канд. техн. наук, **М. О. Годунко**, доц., канд. техн. наук,**Р. А. Кравченко, В. К. Щербина***Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кіровоградський, Україна**e-mail: kir2912s@ukr.net*

Вплив на точність позиціювання промислового робота в процесі експлуатації з токарним верстатом

У статті досліджено актуальні питання забезпечення надійності функціонування роботизованих технологічних комплексів (РТК) на базі токарних верстатів із ЧПУ, зокрема оцінено динаміку зміни точності позиціонування виконавчих механізмів у реальних умовах експлуатації. Авторами детально проаналізовано деструктивний вплив факторів виробничого середовища - агресивного впливу мастильно-охолоджувальних рідин (МОР) та налипання дрібнодисперсних залишків металевої стружки - на кінематичні пари та затискні елементи захватного пристрою промислового робота, що призводить до виникнення прогресуючих похибок та зниження надійності фіксації заготовок. Для нівелювання цих негативних чинників запропоновано комплексне інженерне рішення, яке передбачає модернізацію алгоритмів керування шляхом введення спеціалізованих адаптивних циклів роботи маніпулятора, а також інтеграцію в систему додаткового датчика зворотного зв'язку для безперервного контролю стану і параметрів спрацьовування затискних механізмів, що в сукупності дозволяє підвищити автономність РТК та знизити рівень браку продукції.

промисловий робот, захватний пристрій, точність позиціонування, токарний верстат, адаптивні системи

Постановка проблеми. Сучасні конструкції порталних промислових роботів активно використовуються разом із токарними верстатами з ЧПК. Особливу увагу слід звернути на варіанти коли відбувається інтеграція порталного промислового робота у конструкцію токарних верстатів, що призводить до виникнення ряду особливостей в процесі експлуатації. На сам перед даний робототехнічний комплекс працює в складних умовах з постійною взаємодією з мастильно-охолоджуючою рідиною та налипанням стружки на виконавчі механізми, в умовах неперервного циклу виробництва. Дані умови експлуатації призводять до зношення виконавчих механізмів промислового робота, що призводить до зниження точності позиціонування. Отже дослідження позиціонування порталних промислових роботів, котрі інтегровані в конструкцію токарних верстатів з ЧПК, які працюють в складних умовах є актуальним науково-технічним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На основі проведеного дослідження літературних джерел позиціонування порталних роботів у верстатних комплексах є науковою та практичною задачею, де сумарна похибка формується з геометричних, кінематичних та силових складових [1, 2]. Хоча пружні деформації конструкції та мікроскопічна асиметрія роботи приводів вимагають застосування алгоритмів онлайн-компенсації [2, 3, 4], ефективність таких методів і загального калібрування критично залежить від стабільності механічних параметрів системи [4]. Дослідження доводять, що домінуючим чинником деградації точності є агресивне технологічне середовище: мастильно-охолоджувальна рідина (МОР), стружка та температурні коливання, які призводять до неконтрольованої зміни коефіцієнтів тертя, зносу та втрати жорсткості [1].

Оскільки виключно програмної корекції в агресивних умовах недостатньо, забезпечення точності вимагає комплексного підходу. Згідно з промисловими рекомендаціями провідних виробників та міжнародними стандартами (ISO 10218-1, 10218-2), стабільна робота потребує підвищеного класу IP-захисту, герметизованих оболонок та спеціальної компоновки для безперешкодного відведення рідин і уникнення зон накопичення забруднень [5, 6]. Таким чином, стабільність позиціонування порталного робота є науково-технічною задачею, що має враховувати фізичний захист критичних вузлів, організацію дренажу та керування потоками забруднень у межах архітектури всього технологічного комплексу.

Аналіз досліджень приведених у працях [7,8], підтверджують, що будь-яке погіршення жорсткості, зростання люфтів або нестабільність параметрів тертя безпосередньо трансформується у втрату точності позиціонування. Також визначено, що навіть мінімальні зміни в структурній жорсткості кінематичних ланок істотно впливають на кінцеве положення робочого органу [9]. У свою чергу калібрування робота є ефективним лише за умови стабільності його механічного стану, який у реальному виробничому середовищі швидко порушується [10]. Аналогічні висновки щодо впливу зовнішніх факторів на точність давно сформульовані й у теорії верстатобудування, де температурні та експлуатаційні впливи розглядаються як головне джерело дрейфу точності [10].

Отже, метою проведеного дослідження є підвищення точності та стабільності позиціонування порталних роботів у складі верстатних комплексів шляхом розробки системного підходу, який інтегрує методи алгоритмічної компенсації похибок із конструктивно-компонувальними рішеннями.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження і вдосконалення точності позиціонування порталного промислового робота, котрий повинен забезпечити нівелювання недоліків викликаних складними умовами експлуатації.

Виклад основного матеріалу. У ході комплексного дослідження порталного робототехнічного комплексу (рис. 1), інтегрованого у технологічну систему металообробного верстата, було проведено детальне візуальне обстеження робочої зони, захватного органу та системи керування. Отримані результати дозволяють не лише охарактеризувати реальні умови функціонування комплексу, а й сформулювати науково обґрунтовані висновки щодо впливу агресивного експлуатаційного середовища на точність та стабільність позиціонування виконавчих механізмів.

Аналіз загального вигляду внутрішньої робочої камери верстата свідчить про те, що порталний робот функціонує в умовах, характерних для інтенсивного виробничого процесу. Робоча зона відзначається значною присутністю мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) та металевої стружки, які рівномірно розподіляються по внутрішніх поверхнях конструктивних елементів.

Слід зазначити, що аерозольний вплив середовища не обмежується безпосередньою зоною різання, а поширюється на всю робочу камеру, включаючи кінематичні вузли порталної системи - лінійні напрямні, гвинтові передачі, карданні з'єднання та кабельні траси. За умов роботи з охолоджуючими рідинами на водно-емульсійній або мінерально-масляній основі дрібнодисперсний аерозоль здатен проникати у прецизійні спряження, спричиняючи прискорений знос та зміну характеристик тертя. Наявність касетних плит із заготовками вказує на циклічний характер роботи системи в режимі «верстат - робот - накопичувач», де повторюваність і точність позиціонування є критичними параметрами для забезпечення стабільності всього технологічного ланцюга.



Рисунок 1 – Загальний вигляд робочої зони верстата з порталним роботом

Джерело: розроблено авторами

Детальний огляд захватного пристрою (рис. 2,) виявив суттєве експлуатаційне забруднення, що проявляється у вигляді налипання дрібної та укрупненої стружки, масляних відкладень та продуктів абразивного зносу. З точки зору робототехніки, подібний стан виконавчого органу є комплексним дестабілізуючим фактором, що впливає на систему одразу за декількома напрямками.



Рисунок 2 – Захватний пристрій робота в умовах експлуатації

Джерело: розроблено авторами

Рівняння позиціонування захватного пристрою, враховуючи його кінематичну структуру та роботу з палетою буде характеризуватись наступним:

$$P=P_o + \Delta X*(i-1)+\Delta Y*(j-1)+\Delta Z*k$$

де P_o – базова точка; i, j – індекс комірки матриці; $\Delta X, \Delta Y$ – проміжок між деталями; ΔZ – висота деталі.

Накопичення відкладень призводить до зміни масо-інерційних характеристик захвату, що позначається на точності відпрацювання динамічних траєкторій, особливо при високих швидкостях переміщення та різких змінах напрямку руху - регулятори моментів та алгоритми компенсації, налаштовані на номінальні параметри, починають вносити систематичну похибку. Порушення геометрії контактних поверхонь губок захвату внаслідок забруднення або механічного зносу безпосередньо знижує точність та повторюваність захоплення деталей, що є неприйнятним в умовах автоматизованого виробництва з жорсткими допусками на базування. Забруднення пневматичних комунікацій та рухомих елементів привода може спричинити нестабільність зусилля затискання, часові затримки спрацювання та, у критичних випадках, відмову механізму утримання деталі під час транспортування.

Панель керування верстатом (рис. 3) відображає параметри автоматичного режиму роботи, а значення лічильника циклів підтверджує тривалу та інтенсивну експлуатацію комплексу. З наукової точки зору це принципово важливо: зафіксований стан обладнання слід розглядати як статистично репрезентативний і типовий для даного класу виробничих умов, а не як випадковий чи аварійний. Це підтверджує системний характер впливу експлуатаційного середовища на функціонування комплексу та виключає можливість трактування виявлених дефектів як наслідку одиничного інциденту. Крім того, аналіз журналу параметрів дозволяє відстежити можливу кореляцію між кількістю виконаних циклів та дрейфом точнісних характеристик системи, що становить самостійну наукову цінність для побудови моделей прогностичного технічного обслуговування



Рисунок 3 – Панель керування верстатом

Джерело: розроблено авторами

Зображення внутрішньої камери верстата в процесі роботи (рис. 4) демонструє значне накопичення МОР та продуктів обробки. Помітне зниження прозорості

оглядового вікна є непрямим, але об'єктивним індикатором високої концентрації аерозолів у замкненому об'ємі робочої камери. В таких умовах всі елементи системи - датчики зворотного зв'язку, оптичні вимірювальні системи, енкодери лінійних переміщень, контактні роз'єми - зазнають безперервного агресивного впливу. Особливої уваги заслуговує стан прецизійних лінійних напрямних порталу: потрапляння абразивних частинок металевої стружки у попередньо навантажені кулькові або роликові каретки призводить до стрибкоподібного зростання сил тертя та виникнення мікровібрацій, які безпосередньо транслюються у похибку позиціонування захватного органу.



Рисунок 4 – Внутрішня камера під час роботи РТК

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, результати комплексного візуального аналізу дозволяють зробити обґрунтований висновок: точність позиціонування портального робота у складі металообробного верстата визначається не лише його кінематичними, конструктивними та алгоритмічними характеристиками, а значною мірою залежить від реальних умов експлуатації. Рівень забруднення робочої зони, стан виконавчих органів та інтенсивність аерозольного впливу є самостійними факторами деградації точнісних характеристик системи. З практичної точки зору, для підтримання заявлених виробником точностних параметрів у подібних умовах необхідне впровадження регламентованого технічного обслуговування захватних пристроїв, застосування захисних кожухів для прецизійних елементів кінематики, а також розробка адаптивних алгоритмів компенсації похибок, що враховують поточний стан виконавчої системи. Перспективним напрямком є також інтеграція методів машинного навчання для прогнозування деградації та планування технічного обслуговування на основі аналізу даних лічильників циклів і сигналів датчиків зворотного зв'язку.

У контексті виявлених експлуатаційних недоліків портального робототехнічного комплексу можна запропонувати комплекс технічних та організаційних заходів,

спрямованих на усунення або мінімізацію їх негативного впливу на точність і стабільність функціонування системи.

Першочерговим заходом є впровадження регламентованого технічного обслуговування захватного пристрою з чітко визначеною періодичністю, яка встановлюється на основі аналізу даних лічильника циклів. Програма обслуговування має включати очищення контактних поверхонь губок від стружки та масляних відкладень, перевірку геометричних параметрів захвату, діагностику пневматичних або гідравлічних комунікацій, а також контроль зусилля затискання за допомогою динамометричних засобів. Такий підхід дозволить своєчасно виявляти знос і запобігати накопиченню відкладень до критичного рівня.

Окремої уваги потребує оптимізація системи подачі мастильно-охолоджувальної рідини. Застосування спрямованих сопел із регульованим тиском, а також впровадження систем мінімального змащення або подачі МОР через шпіндель дозволить суттєво знизити інтенсивність аерозольного забруднення робочої камери без погіршення якості обробки. Додатково рекомендується оснащення верстата більш ефективною системою видалення стружки - наприклад, шнековими або скребковими конвеєрами, що зменшить накопичення продуктів різання в зоні маніпулювання деталями.

З точки зору системи керування, перспективним є впровадження адаптивних алгоритмів компенсації похибок позиціонування, що враховують поточний стан виконавчої системи. Зокрема, алгоритми можуть коригувати траєкторії руху на основі даних про змінення масо-інерційних характеристик захвату або враховувати температурні деформації конструкції, характерні для тривалої роботи. Інтеграція додаткових сенсорів-акселерометрів для контролю вібрацій, датчиків сили для моніторингу зусилля захоплення, а також технічного зору для верифікації позиції деталі - суттєво підвищить надійність і повторюваність операцій.

Стратегічним напрямком є впровадження системи прогностичного технічного обслуговування на основі методів машинного навчання. Аналіз накопичених даних про кількість виконаних циклів, відхилення в сигналах датчиків зворотного зв'язку та динаміку зміни точностних параметрів дозволить прогнозувати момент настання відмови або деградації ключових вузлів ще до виходу системи за межі допустимих параметрів. Це переведе обслуговування з реактивної моделі у проактивну, мінімізуючи незаплановані простої та витрати на усунення наслідків відмов.

Нарешті, на рівні проектування необхідно розглянути питання підвищення ступеня захисту електричних та електронних компонентів системи керування до рівня не нижче IP65, що відповідає умовам роботи в середовищах із значним аерозольним та рідинним забрудненням. Для вже введених в експлуатацію комплексів доцільним є додаткове герметизування роз'ємних з'єднань, застосування захисних кабельних рукавів та регулярний контроль стану ізоляції електричних ліній.

Висновки. Результати комплексного аналізу свідчать, що точність та стабільність функціонування портального робота у складі металообробного верстата критично залежать від реальних умов експлуатації, зокрема від забруднення робочої зони та аерозольного впливу, що вимагає переходу від реактивної до проактивної моделі обслуговування. Для мінімізації деградації точностних характеристик обґрунтовано впровадження комплексу технічних та організаційних заходів, які включають регламентоване ТО захватних пристроїв за лічильником циклів, оптимізацію подачі МОР і видалення стружки, а також підвищення класу захисту електрокомпонентів до рівня IP65. З боку системи керування стратегічним рішенням є інтеграція додаткових сенсорів і адаптивних алгоритмів компенсації похибок із

перспективою впровадження методів машинного навчання для прогностичного моніторингу, що дозволить прогнозувати знос вузлів, мінімізувати незаплановані простой та забезпечити стабільну повторюваність операцій у складних виробничих умовах.

Список літератури

1. Robots in machining / A. Verl et al. *CIRP Annals*. 2019. Vol. 68, no. 2. P. 799–822. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.009>.
2. Compliance Error Compensation in Robotic-Based Milling / A. Klimchik et al. *Informatics in Control, Automation and Robotics*. Cham, 2014. P. 197–216. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-03500-0_13.
3. Online compliance error compensation system for industrial manipulators in contact applications / M. K. Gonzalez та ін. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022. Т. 76. С. 102305. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102305>.
4. A Non-Delay Error Compensation Method for Dual-Driving Gantry-Type Machine Tool / Q. Liu et al. *Processes*. 2020. Vol. 8, no. 7. P. 748. URL: <https://doi.org/10.3390/pr8070748>.
5. Industrial robots – Safety requirements . Part 1: Robots : ISO 10218-1:2025. Geneva : International Organization for Standardization, 2025. URL: <https://www.iso.org/standard/78002.html> (дата звернення: 22.01.2026).
6. Industrial robots – Safety requirements – Part 2: Robot systems and integration : ISO 10218-2:2025. – Geneva : International Organization for Standardization, 2025. – URL: <https://www.iso.org/standard/78003.html> (дата звернення: 22.01.2026).
7. Vitalii Mazhara, Anatolii Artiukhov, Maksym Hodunko, Kyryl Shcherbyna, Svitlana Tenenyka. Structural Design of Robotic Complexes . *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж.міжвід.наук.-техн. зб.* 2025. Вип. 55. С. 43-49. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2025.55.43-49>
8. Годунко М., Мажара В., Кислун О., Щербина В., Писанка С. Дослідження можливості підвищення точності захватного пристрою робота за рахунок компенсуючої ланки затискного важеля . *Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки*. 2024. №3 (337). С.52-56. URL: <https://heraldts.khmnu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/114> (дата звернення: 02.03.2026).
9. Годунко, М. О., Мажара, В. А., Щербина, В. К., Кравченко, Р. А. Дослідження залежності сил затиску в захватному пристрої робота від його конструктивних параметрів та межі міцності деталі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2026. Вип. 14(45). С. 22–31. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14\(45\).22-31](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).22-31)
10. Розробка методики силового розрахунку вертикально орієнтованого захватного пристрою / М.О. Годунко, О.А. Кислун, В.А. Мажара та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр.* 2023. Вип. 7 (38). URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/13419>

References

1. Verl, A., et al. (2019). Robots in machining. *CIRP Annals*, 68(2), 799–822. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.009>
2. Klimchik, A., et al. (2014). Compliance error compensation in robotic-based milling. *In Informatics in Control, Automation and Robotics (pp. 197–216)*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03500-0_13
3. Gonzalez, M. K., et al. (2022). Online compliance error compensation system for industrial manipulators in contact applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 76, Article 102305. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102305>
4. Liu, Q., et al. (2020). A non-delay error compensation method for dual-driving gantry-type machine tool. *Processes*, 8(7), Article 748. <https://doi.org/10.3390/pr8070748>
5. International Organization for Standardization. (2025). Industrial robots – Safety requirements – Part 1: Robots (ISO Standard No. 10218-1:2025). <https://www.iso.org/standard/78002.html>
6. International Organization for Standardization. (2025). Industrial robots – Safety requirements – Part 2: Robot systems and integration (ISO Standard No. 10218-2:2025). <https://www.iso.org/standard/78003.html>

7. Mazhara, V., Artiukhov, A., Hodunko, M., Shcherbyna, K., & Tenenka, S. (2025). Structural Design of Robotic Complexes. *Design, Manufacture and Operation of Agricultural Machines*, (55), 43–49. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2025.55.43-49>
8. Hodunko, M., Mazhara, V., Kyslun, O., Shcherbyna, V., & Pysanka, S. (2024). Research on the possibility of increasing the accuracy of the robot gripper due to the compensating link of the clamping lever. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, (3), 52–56. URL: <https://heraldts.khmn.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/114> [in Ukrainian].
9. Hodunko, M. O., Mazhara, V. A., Shcherbyna, V. K., & Kravchenko, R. A. (2026). Study of the dependence of clamping forces in the robot gripper on its design parameters and the ultimate strength of the part. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, (14(45)), 22–31. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14\(45\).22-31](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).22-31) [in Ukrainian].
10. Hodunko, M. O., Kyslun, O. A., Mazhara, V. A., Shcherbyna, V. K., Kravchenko, R. A., & Kliushkin, V. V. (2023). Development of a method for force calculation of a vertically oriented gripping device. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 7(38)). URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/13419> [in Ukrainian].

Kyryl Shcherbyna, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Maksym Hodunko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Roman Kravchenko**, **Volodymyr Shcherbyna**

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Influence on the Positioning Accuracy of an Industrial Robot During Operation with a Lathe

The aim of this study is to improve the positioning accuracy and operational stability of gantry robots integrated into machine-tool systems by developing a systematic approach that combines algorithmic error compensation techniques with structural and layout optimization solutions. A comprehensive investigation of a gantry robotic system integrated into the technological system of a metal-cutting machine tool was conducted. The study included a detailed visual inspection of the working area, the end-effector (gripper), and the control system. The obtained results not only characterize the actual operating conditions of the robotic complex but also provide a scientifically substantiated basis for assessing the influence of an aggressive production environment on the positioning accuracy and operational stability of the robot's actuating mechanisms. This paper addresses current issues related to ensuring the reliable operation of robotic technological complexes (RTCs) based on CNC turning machines, with particular emphasis on evaluating the variation in positioning accuracy of robotic actuators under real industrial operating conditions. The destructive effects of production environment factors – including the aggressive action of cutting fluids (CFs) and the adhesion of fine metallic chips – on the kinematic pairs and clamping elements of the industrial robot gripper are comprehensively analyzed. These factors lead to progressive positioning errors, deterioration of gripping performance, and a reduction in the reliability of workpiece fixation. To mitigate these adverse effects, a comprehensive engineering solution is proposed. The proposed approach involves modernizing the robot control algorithms by incorporating dedicated adaptive manipulator operating cycles, as well as integrating an additional feedback sensor into the control system for continuous monitoring of the condition and actuation parameters of the clamping mechanism. The combined implementation of these measures enhances the autonomy of the robotic technological complex while reducing the defect rate of manufactured products. Further improvement in the operational efficiency of the robotic system is proposed through the enhancement of its control architecture. In particular, the integration of additional condition-monitoring sensors, the application of adaptive positioning error compensation algorithms, and the implementation of machine learning techniques for predictive diagnostics of critical mechanical assemblies are recommended. The implementation of these solutions will enable early detection of equipment wear, reduce unplanned downtime, increase the reliability of the manufacturing process, and ensure stable positioning accuracy and repeatability of technological operations even under severe industrial operating conditions.

industrial robot, gripper, positioning accuracy, CNC turning machine, adaptive systems

Одержано (Received) 17.06.2026

Прорецензовано (Reviewed) 24.06.2026

Прийнято до друку (Approved) 26.06.2026